

Rentabilidad económica y análisis de sensibilidad del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132 a escala piloto

Economic Profitability and Sensitivity Analysis of the Beer Production Process from Red Sorghum CIAP R-132 at Pilot Scale

Amaury Pérez Sánchez*

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Aplicadas
Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", Cuba
<https://orcid.org/0000-0002-0819-6760>
amaury.psanchez@reduc.edu.cu

Delcio Venâncio de Magalhães Malengue

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Aplicadas
Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", Cuba
<https://orcid.org/0000-0002-1534-0927>
delcio.malengue@reduc.edu.cu

Isnel Benitez Cortés

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Aplicadas
Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz", Cuba
<https://orcid.org/0000-0003-2427-640X>
isnel.benites@reduc.edu.cu

Fecha de recepción: 7 de febrero de 2020

Fecha de aceptación: 15 de junio de 2020

Sugerencia de citación: Pérez-Sánchez, A., de Magalhães-Malengue, D. C. y Benitez-Cortés, I. (2020). Rentabilidad económica y análisis de sensibilidad del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132 a escala piloto. *Mutis*, 10(2), en prensa. doi: 10.21789/22561498.1665

RESUMEN

En el presente trabajo se efectuó la simulación de una planta de producción de cerveza a escala piloto (150 L/lote), empleando sorgo rojo CIAP R-132 como materia prima principal. Se efectuó un estudio de sensibilidad consistente en 11 corridas experimentales, mediante el cual se evaluó la influencia de tres variables iniciales (capacidad de producción de cerveza por lote, costo de adquisición del sorgo rojo y precio de venta de la botella de cerveza) sobre tres indicadores económicos de importancia: valor actual neto (VAN), tasa interna de retorno (TIR) y período de recuperación de la inversión (PRI). Se deben invertir \$ 570.000 pesos cubanos (CUP) para erigir la planta de producción, el costo unitario de producción alcanzó un valor de CUP 12,82/botella, mientras que se obtuvo un valor de VAN, TIR y PRI de CUP 480.000, 28,83 % y 3,82 años, respectivamente, lo cual califica al proyecto como económicamente rentable y factible desde el punto de vista inversionista. Se obtuvieron ecuaciones que establecen la correlación estadística existente entre las tres variables de entrada y las tres de salida. Se empleó el simulador SuperPro Designer® v.8.5 para efectuar la simulación y el software Statgraphics Centurion XVI® para el procesamiento estadístico de los datos.

* Autor de correspondencia.

Palabras clave: análisis de sensibilidad, cerveza, rentabilidad económica, simulación, sorgo.

ABSTRACT

This work presents the simulation of a pilot scale beer production plant (150 L/batch) with red sorghum CIAP R-132 as the main raw material. A sensitivity study consisting of 11 experimental runs was carried out, through which the influence of three initial variables (beer production capacity per batch, purchasing cost of red sorghum, and sale price of the beer bottle) was evaluated over three important economic indicators: Net present value (NPV), internal rate of return (IRR), and payback time (PT). Results show that \$ 570,000 Cuban pesos (CUP) must be invested to erect the production plant, the unit cost of production reached a value of CUP 12.82/bottle, while NPV, IRR and PT values were CUP 480,000, 28.83% and 3.82 years, respectively, which qualifies the project as economically profitable and feasible from the investor's point of view. Several equations were obtained that establish the statistical correlation between the three input variables and the three output variables. The SuperPro Designer[®] v.8.5 simulator was used to carry out the simulation, as well as Statgraphics Centurion XVI[®] software for the statistical processing of data.

Keywords: Sensitivity analysis, beer, economic profitability, simulation, sorghum.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria química cubana debe basar su desarrollo en investigaciones hacia la búsqueda de productos que puedan resultar atractivos desde el punto de vista de su uso, calidad y mercado, lo cual conllevaría también a su factibilidad técnica, económica y ambiental (Nieblas *et al.*, 2016).

El sorgo constituye el quinto cereal más importante en el mundo, después del arroz, el trigo, el maíz y la avena, siendo el principal cereal alimenticio para alrededor de 750 millones de personas viviendo en regiones tropicales semiáridas de África, Asia y Latinoamérica (Ramatoulaye *et al.*, 2016). Este cereal contiene varias propiedades beneficiosas y se ha demostrado que su cultivo es económicamente rentable, teniendo en cuenta su bajo costo de producción, resistencia a la sequía y altas temperaturas, dadas sus características de rusticidad, y la realización de varias cosechas o cortes, además de no contener el gluten que afecta a los enfermos celíacos, por lo que se constituye en una excelente alternativa para la sustitución de importaciones (Rodríguez *et al.*, 2015).

La cerveza es una expresión genérica para designar a la bebida resultante de fermentar, mediante levadura seleccionada, el mosto procedente de la malta de granos de cereal (solo o mezclado con otros adjuntos cerveceros transformables en azúcares por digestión enzimática). Esta bebida es sometida previamente a un proceso de cocción y aromatización de sus extractos y/o concentrados con flores de lúpulo (Gallardo *et al.*, 2013).

En la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, se ha trabajado por varios años en el desarrollo y la obtención de productos a partir del sorgo, entre los que se encuentran la producción de jarabes dextrinizados (Rodríguez *et al.*, 2015), maltina (Díaz, 2014; Gallardo *et al.*, 2013), cerveza (Carvajal, 2014; Nieblas *et al.*, 2016; Ortega, 2016; Pino, 2017) y etanol (Gallardo *et al.*, 2011).

La simulación de procesos para la evaluación de alternativas y la mitigación de pérdidas en un proceso determinado juega un papel muy importante para obtener el modelo final de la simulación, ya que este puede revelar a gran escala si un proceso futuro puede dar resultados acertantes (o no) en cuanto a su factibilidad técnica y económica (Auli *et al.*, 2013). La simulación de una planta química consiste en la creación de un modelo de proceso o de costo, entendiéndose por modelo una descripción del comportamiento de un proceso real, el cual sea capaz de predecir la salida (esto es, las respuestas) en función de las entradas. Entre los múltiples simuladores de procesos existentes en la actualidad, SuperPro Designer® es uno de los más relevantes para la industria de procesos químicos, siendo empleado fundamentalmente para la realización de balances de masa, estudios de factibilidad y análisis económicos de variantes, así como en el diseño y la evaluación conceptual de procesos y plantas químicas (Aguiar *et al.*, 2018; Csighy *et al.*, 2017; Govindarajan *et al.*, 2019; Lam *et al.*, 2014; Mani *et al.*, 2016).

Entre los indicadores más importantes para evaluar un proyecto en ingeniería química desde el punto de vista económico se encuentran el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación de la inversión (PRI) (Sayar *et al.*, 2019). El VAN da cuenta del valor del dinero en el tiempo y es la diferencia entre el valor presente de todos los flujos de caja positivos (presentes y futuros) y los flujos de salida al contado, tales como la inversión de capital; se trata de una medida de la factibilidad del proceso propuesto. La TIR no es más que la tasa de descuento que hace igual a cero el valor del VAN a lo largo de un tiempo predeterminado de vida del proyecto. Este constituye

generalmente una base comparativa excelente para evaluar el proyecto en el ambiente económico local. Por último, el PRI se refiere a la duración requerida para que los ingresos totales igualen la inversión de capital inicial (Peters *et al.*, 2003).

El análisis de sensibilidad se emplea para determinar la manera en que determinado proceso reacciona a cambios en variables claves, tanto de diseño como de operación, del proceso bajo estudio. Este análisis presenta múltiples beneficios, entre los que sobresalen el estudio de la influencia de los cambios efectuados en variables de entrada sobre variables de salida, verificar que es factible la solución a las especificaciones de diseño, representar gráficamente las influencia de las variables iniciales y estudiar las variables que fluctúan en el tiempo a través de un método en estado cuasi-estacionario (Ibrahim *et al.*, 2020). Hasta la fecha, son varios los autores que han efectuado estudios de sensibilidad en diversos procesos químicos, entre los cuales se pueden mencionar el diseño de un absorbedor para la captura de dióxido de carbono utilizando aminas (Razi *et al.*, 2013), la evaluación técnico-económica del proceso de producción de biodiésel (Tang *et al.*, 2015), la producción de Heparinasa I expresada en *Escherichia coli* (Ernst *et al.*, 1997) y la producción de etanol a partir de biomasa lignocelulósica (Rao, 2005).

El sorgo rojo, variedad CIAP R-132, ha sido utilizado para evaluar el proceso de molienda en húmedo de la extracción del almidón contenido en los granos (Rodríguez *et al.*, 2015); la producción de jarabes dextrinizados mediante hidrólisis enzimática del almidón, aplicando la enzima α -amilasa (Rodríguez *et al.*, 2015); como componente adjunto mezclado con cebada para la obtención de cerveza y malta a escala piloto (50 L) (Nieblas *et al.*, 2016); y como única materia prima para la obtención de cerveza a escala de laboratorio (Alfonso, 2018). Sin embargo, hasta la fecha, no se ha reportado su empleo de forma integral para la producción de cerveza a escala de planta piloto, por lo que no se conoce qué valores tendrán los principales indicadores técnicos y económicos de una planta de este tipo.

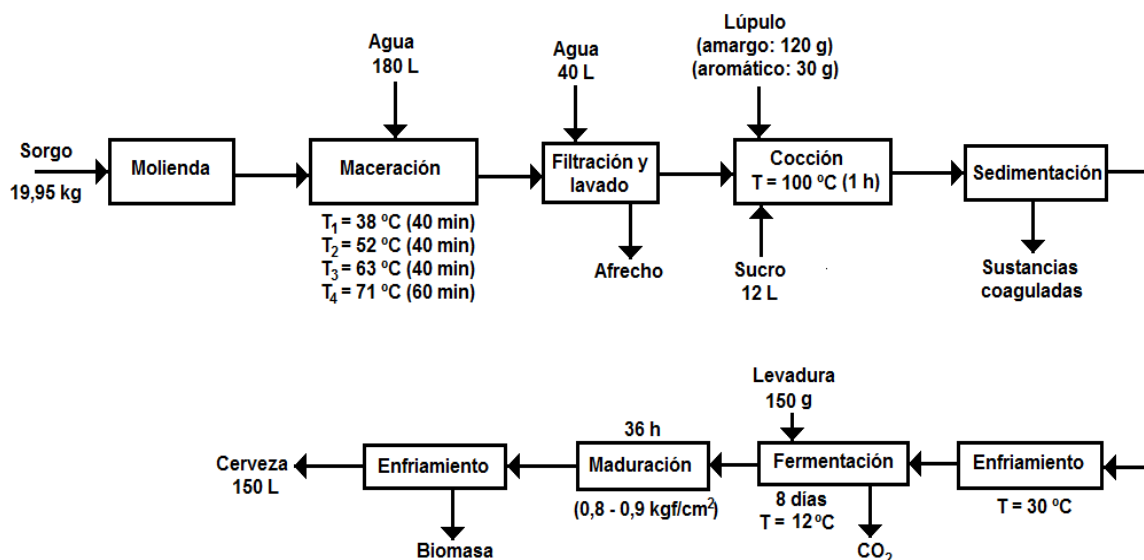
Considerando los elementos hasta aquí descritos, el objetivo general del presente trabajo consiste en determinar la rentabilidad técnica y económica del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132 a escala de planta piloto (150 L/lote) en el contexto económico actual de Cuba. Además, se efectúa un estudio de sensibilidad con el fin de evaluar la influencia que presentan tres variables iniciales, (i) capacidad de producción de cerveza por lote, (ii) costo de adquisición del sorgo rojo y (iii) precio de venta de la botella de cerveza, sobre tres importantes parámetros económicos del proceso de producción evaluado: VAN, TIR y PRI. Por último, se determinó la correlación estadística existente entre las tres variables iniciales seleccionadas y los parámetros económicos VAN, TIR y PRI, para así obtener correlaciones que describan cuantitativamente la relación estadística existente entre estas variables.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132

En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques en los que se exponen las principales etapas del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132.

Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132



Fuente: elaboración propia.

Este proceso cuenta con dos subetapas principales, siendo la primera la subetapa en caliente donde se realizan las siguientes operaciones:

1. Molienda
2. Maceración
3. Filtración y lavado
4. Cocción del mosto
5. Sedimentación

La segunda subetapa, conocida como etapa en frío, consta de las siguientes etapas:

1. Enfriamiento
2. Inyección de la levadura y fermentación
3. Maduración
4. Enfriamiento, reposo de la cerveza y extracción de la levadura
5. Envasado

En este caso, el proceso en caliente tiene como objetivo principal disolver las sustancias de la malta y los sucedáneos empleados, desdoblándolos en azúcares fermentables para obtener un mosto libre de contaminación y de sustancias insolubles que sea adecuado para ser fermentado. En esta etapa del proceso ocurren una serie de operaciones con los objetivos descritos a continuación.

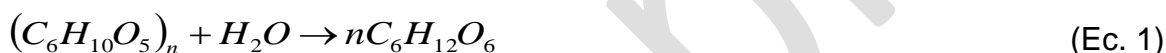
Molienda

Se trituran 19,95 kg de sorgo en un molino de disco para reducir su tamaño hasta obtener una consistencia de harina granulada, con vistas a favorecer la posterior sacarificación del almidón durante el proceso de maceración.

Maceración

La maceración se realiza para lograr la conversión de los almidones contenidos en el sorgo en azúcares fermentables (sacarificación). Para ello, se comienza agregando 180 L de agua al macerador y luego los 19,95 kg de sorgo previamente molidos. Durante el proceso de maceración se llevan a cabo 4 pausas o escalones de temperaturas. En primer lugar, se calienta el agua contenida dentro del macerador hasta una temperatura de 38 °C, a partir de la cual se le agregó el grano de sorgo; esta pausa de temperatura se mantiene durante 40 minutos. Posteriormente, se incrementa la temperatura de la mezcla hasta 52 °C y se mantiene en este valor también durante 40 minutos. Transcurrido este tiempo, se incrementa la temperatura del mosto hasta 63 °C y se conserva durante 40 minutos. Por último, se realiza un incremento de la temperatura hasta 71 °C, permaneciendo en este valor durante 60 minutos. Cumplido este tiempo se incrementa la temperatura del líquido macerado hasta 78 °C con el fin de detener la actividad enzimática. Todo el proceso de maceración se efectúa a una velocidad de agitación de 60 rpm. Una vez finalizado el proceso de maceración, al mosto se le aplica la prueba del yodo a fin de comprobar si existió sacarificación del almidón durante el proceso de maceración; es decir, si el almidón se desdobló en azúcares simples. En el mosto filtrado y enfriado también se mide el valor de Brix y el pH.

La reacción de hidrólisis enzimática del almidón se describe mediante las ecuaciones 1, 2 y 3 (Suárez *et al.*, 2019):



Filtración y lavado

Se procede a separar el líquido (mosto) del sólido (afrecho). Esta separación se realiza en un colador metálico a través del cual fluye el mosto filtrado, siendo almacenado en un recipiente colector metálico. A la torta de afrecho acumulada en el colador se le realiza un lavado con agua a 75-78 °C con el fin de que continúen disolviéndose los azúcares contenidos en esta mezcla sólida. El líquido de lavado es recogido en el mismo recipiente donde se colectó el mosto durante el primer filtrado. El afrecho agotado es comercializado, mientras que el mosto contenido en el recipiente colector es bombeado de vuelta al macerador.

Preparación del sucro

En un recipiente aparte se agregan 10,5 kg de azúcar y 12 L de agua, los cuales son esterilizados a 100 °C por 25 minutos. Una vez concluida la esterilización, la mezcla resultante (sucro) es enfriada.

Cocción

Por medio de la cocción se produce la esterilización y concentración del mosto para que este sea suministrado libre de contaminación microbiana a la etapa de fermentación. En esta operación se logra la coagulación de las sustancias insolubles y la inactivación de las enzimas que hasta este momento siguen realizando su función. En esta etapa se

adicionan 120 g de lúpulo amargo, 30 g de lúpulo aromático y los 12 L de sucro. La cocción se realiza durante 1 hora a una temperatura de 100 °C, tras lo cual se añade agua de proceso, previamente esterilizada, hasta completar 150 litros.

Sedimentación

Una vez finalizada la cocción del mosto, este es vertido en un tanque colector metálico y bombeado hacia un sedimentador tangencial (*whirlpool*) para separar la mayor cantidad de partículas sólidas en suspensión que contiene el mosto caliente, la cual está formada por compuestos tanino-proteicos, globulinas y otras partículas finas provenientes del sorgo, así como también del sucro. En este caso, debido a la fuerte rotación que se produce dentro del sedimentador se reúnen o agrupan los coágulos, los cuales se sedimentan y forman un cono de sustancias coaguladas en el fondo del sedimentador, separándose de esta forma las partículas coagulantes que están en suspensión del líquido clarificado. La mezcla sedimentada es enviada para consumo animal.

Por su parte, la segunda subetapa, es decir, el proceso en frío, tiene como objetivo crear un medio adecuado para la fermentación, lograr una fermentación acelerada y obtener un producto que cumpla con las normas de calidad establecidas. Las etapas incluidas en este proceso son:

Enfriamiento

Se enfría el mosto contenido en el sedimentador hasta una temperatura de 30 °C, haciendo circular agua de enfriamiento por la chaqueta del equipo, la cual proviene de la torre de enfriamiento.

Inyección de la levadura y fermentación

Su objetivo es lograr una fermentación acelerada y una relación adecuada del microorganismo y la cantidad de mosto a fermentar, ocurriendo la transformación de los azúcares en el mosto en alcohol etílico y dióxido de carbono por acción de la levadura. Una vez que el mosto alcanza la temperatura de 30 °C en el sedimentador, este es bombeado hacia el reactor y, seguidamente, se inyecta la levadura. En el reactor, este compuesto es aireado con un botellón de oxígeno por espacio de una hora, aproximadamente. Toda esta operación se efectúa manteniendo la recirculación del medio fermentativo, lo que facilita la reacción en medio agitado, regulando la entrada del oxígeno necesario para el crecimiento y la propagación de la levadura.

La ecuación de fermentación alcohólica se muestra a continuación (ec. 4):



Una vez aireada, se procede a efectuar la fermentación anaerobia para producir la cerveza, proceso que se lleva a cabo a una temperatura de 12 °C. Diariamente se lleva a cabo un análisis de extracto y pH. Cuando el extracto llega a 5 °Brix se pasa a la etapa de maduración.

Maduración

En esta etapa la presión del fermentador aumenta hasta 0,8-0,9 kgf/cm² y la temperatura se mantiene entre 18-19 °C para saturar la cerveza de CO₂. El extracto debe ir disminuyendo paulatinamente al ser fermentado por la levadura. Así mismo, el pH debe

disminuir hasta 3,5-3,8. Cuando el extracto se mantiene constante a un valor límite de fermentación se pasa a la etapa de enfriamiento en el fermentador.

Enfriamiento, extracción de la levadura y reposo de la cerveza

Durante esta etapa se enfría la cerveza hasta 0-2 °C para que precipite la levadura al fondo del fermentador. Esta operación tiene como objetivo separar el resto de la cosecha de levadura sedimentada en el fondo del reactor y eliminar proteínas coagulables, partículas insolubles y sustancias coloidales que no se hayan precipitado en el proceso de fermentación, favoreciendo así la formación de compuestos que aportan el buqué característico de cada tipo de cerveza. En esta etapa, la mezcla se deja reposar por 24 horas y se comienza la extracción de la levadura. Posterior a la extracción se deja reposar por 12 horas. Durante esta operación se debe mantener la presión entre 0,8 y 0,9 kgf /cm² para saturar de CO₂ la cerveza.

Envasado

Una vez extraída la levadura (biomasa) y efectuada la maduración de la cerveza, esta es envasada en botellas de cristal de 350 mL de capacidad.

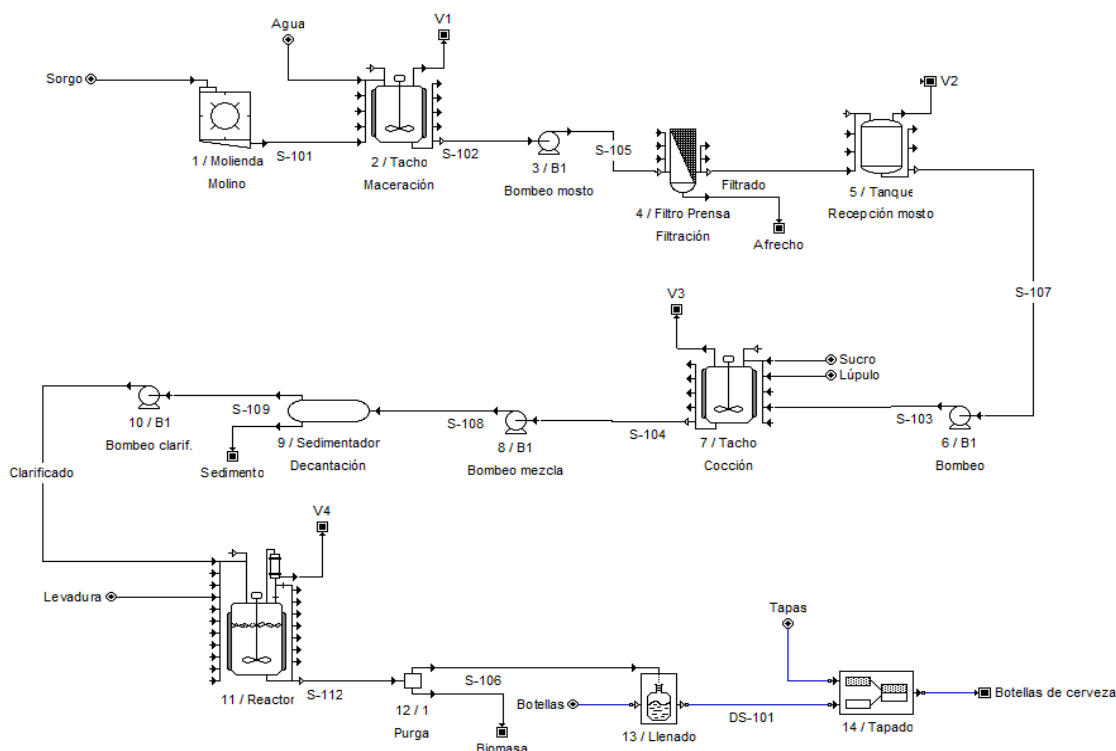
Simulación del proceso de producción en el simulador SuperPro Designer®

Se empleó el simulador profesional de procesos SuperPro Designer® v. 8.5 para simular el proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132, con el fin de aplicar las herramientas de balance de masa y energía, el diseño de equipamiento y los cálculos económicos del proceso bajo estudio (figura 2).

La simulación del proceso productivo en el simulador SuperPro Designer® permitió obtener valores y resultados de un gran número de parámetros técnico-económicos de importancia para este proceso de producción, entre los cuales se puede mencionar VAN, TIR, PRI, costos fijos, capital de trabajo, costo unitario de producción, margen bruto y neto y porcentaje de retorno de la inversión, entre otros.

Para efectuar la simulación se asumió un tiempo de construcción de planta de 15 meses, con 3 meses para realizar la arrancada y puesta en marcha. Se consideró un tiempo de vida del proyecto de 15 años, asumiendo que la planta producirá al 100 % durante todo su tiempo de vida. El VAN fue determinado asumiendo una tasa de interés de 11 % y un 32 % de impuestos por concepto de ingresos. El costo de validación y puesta en marcha se asumió como 15 % de los costos fijos directos (CFD), mientras que los costos asociados con el aseguramiento y control de la calidad se suponen como un 15 % del costo total de la mano de obra. Se asume además que no existe rechazo del producto principal (cerveza) por no cumplir con los parámetros de calidad exigidos, que se gastan alrededor de CUP 20.000 anuales para efectuar operaciones de validación del proceso de producción y que el costo relacionado con el tratamiento de residuales corresponde a 25 % del costo total de operación.

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132 obtenido mediante el simulador SuperPro Designer®



Fuente: elaboración propia.

La planta utiliza todos los servicios auxiliares comúnmente consumidos en un proceso de este tipo, es decir, agua de enfriamiento, glicol, electricidad y vapor de agua. Se asume además que la misma trabaja 11 meses al año, con 1 mes para acometer operaciones de mantenimiento y reparaciones de equipos y sistemas auxiliares. Se aplicó un salario nominal promedio de CUP 2,84/hora para los operarios que trabajan en la planta y CUP 5,00/hora para los supervisores y personal de dirección. La tabla 1 muestra los precios de las principales materias primas consumidas, los materiales utilizados, los servicios auxiliares empleados y los productos obtenidos durante el proceso productivo.

Tabla 1. Precios de las principales materias primas, los servicios auxiliares y los productos obtenidos utilizados en la simulación del proceso productivo (cifras en pesos cubanos [CUP])

Compuesto	Precio	Unidad
Sorgo rojo CIAP R-132	14,05	CUP/kg
Agua	0,10	CUP/m ³
Lúpulo amargo	51,228	CUP/kg
Lúpulo aromático	65,31	CUP/kg
Azúcar crudo	356,15	CUP/t
Afrecho	60	CUP/t
Levadura	50	CUP/t
Agua de enfriamiento	0,05	CUP/t

Glicol	0,40	CUP/t
Vapor de agua	3,50	CUP/t
Electricidad	1,20	CUP/kWh
Botella 350 mL	0,306	CUP/Ud
Tapas	0,007	CUP/Ud
Cerveza envasada en botellas de 350 mL	24	CUP/botella

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se muestran los costos de adquisición de cada equipo empleado en el proceso productivo, los cuales fueron tomados de varias fuentes y referencias bibliográficas (Perry & Green, 2008; Peters *et al.*, 2003; Towler & Sinnott, 2013; Sinnott & Towler, 2019). El producto final obtenido (cerveza) se envasará en botellas de cristal de 350 mL de capacidad.

Tabla 2. Costo del equipamiento principal empleado en el proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132

Equipo	Características	Cantidad	Costo total (CUP)
Molino de discos	40 kg/h	1	10.200
Macerador	200 L	1	13.000
Filtro colador	25 m ²	1	3.000
Tanque recepción mosto	200 L	1	10.000
Sedimentador	200 L	1	14.300
Reactor	200 L	1	15.700
Bomba centrífuga sanitaria	3,5 kW	1	4.900
Total			71.100

Fuente: elaboración propia.

La tabla 3 muestra la composición química porcentual del sorgo y el lúpulo utilizados durante la simulación, datos obtenidos de Díaz (2014) y Pérez (2016), respectivamente. Por último, se escoge una capacidad promedio de producción de la planta de 150 litros de cerveza por lote.

Tabla 3. Composición química porcentual del sorgo y el lúpulo utilizados en la simulación

Componente	Sorgo (%)	Lúpulo (%)
Humedad	10,6	10,0
Almidón	69,3	-
Proteína	12,5	15,0
Grasa	3,4	-
Fibra	2,2	-
Cenizas	2,0	3,0
Resinas	-	15,0
Taninos	-	4,0
Alfa-ácidos	-	8,0
Lignina	-	45,0

Fuente: elaboración propia con base en Díaz (2014) y Pérez (2016).

Evaluación de la sensibilidad de los indicadores seleccionados

Considerando los resultados técnico-económicos obtenidos durante la simulación del proceso productivo a través del simulador SuperPro Designer®, se desarrolló un diseño de experimentos estadísticos del tipo Superficie de Respuesta por medio del software estadístico Statgraphics Centurion®^{xvi} para evaluar la influencia de tres variables iniciales o de entrada (capacidad de producción de cerveza por lote, costo de adquisición del sorgo rojo y precio de venta de la botella de cerveza) sobre tres importantes parámetros de salida de proceso: VAN, TIR y PRI. De esta manera, se llevará a cabo un estudio de sensibilidad de 3 entradas y 3 salidas.

Para elaborar el diseño de experimentos descrito, a los valores utilizados durante la simulación para las 3 variables iniciales consideradas se le aumentará o disminuirá 20 %. Lo anterior con el objetivo de tomar en cuenta posibles variaciones u oscilaciones de los valores que puedan presentar estas variables en el futuro y evaluar la potencial influencia tales fluctuaciones en los resultados de VAN, TIR y PRI para la planta propuesta.

Se elaboró un diseño de experimentos del tipo superficie de respuesta aleatorizado aplicando la opción “Box-Behnken Design”, contenida en el paquete estadístico Statgraphics Centurion®, obteniendo inicialmente 30 corridas experimentales en total. Estas últimas fueron posteriormente optimizadas mediante la herramienta “D-Optimality”, contenida en el propio software estadístico, con el objetivo de seleccionar aquellas corridas que presentan mayor influencia estadística sobre las 3 variables de salida tomadas en cuenta, así como también reducir la extensión del estudio de sensibilidad, llegando finalmente a 11 corridas experimentales. En la tabla 4 se muestran los valores que deben presentar cada una de las 3 variables de entrada tomando en cuenta el rango de ± 20 %. Por su parte, la tabla 5 expone los valores que deberán presentar estos 3 parámetros dentro del diseño de experimentos optimizado que contiene las 11 corridas experimentales.

Tabla 4. Valores que deben presentar cada una de las 3 variables de entrada consideradas tomando en cuenta un rango de variación de $\pm 20\%$

Parámetro	Valor utilizado	Valor mínimo (- 20 %)	Valor máximo (+ 20 %)
Capacidad de producción (L/lote)	150	120	180
Costo de compra sorgo (CUP/kg)	14,05	11,24	16,86
Precio de venta cerveza (CUP/kg)	24	19,2	28,8

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Estudio de sensibilidad optimizado que contiene los valores a considerar de cada parámetro de entrada

Corrida	Capacidad de producción (L/lote)	Costo de compra sorgo (CUP/kg)	Precio de venta cerveza (CUP/botella)
1	180	11,24	28,8
2	180	11,24	19,2
3	180	16,86	19,2
4	120	16,86	19,2
5	120	16,86	28,8
6	180	11,24	19,2
7	120	16,86	19,2
8	120	11,24	28,8
9	180	16,86	28,8
10	120	16,86	19,2
11	120	11,24	19,2

Fuente: elaboración propia.

Evaluación de la correlación estadística existente entre las variables de entrada y los indicadores VAN, TIR y PRI

Una vez efectuado el estudio de sensibilidad, se procedió a realizar un análisis de la correlación estadística existente entre las tres variables de entrada consideradas y los tres parámetros económicos de salida evaluados, con el objetivo de obtener correlaciones o ecuaciones que describan, de forma cuantitativa, la relación estadística existente entre las variables de entrada y las de salida. Lo anterior se llevó a cabo utilizando la opción "Multiple Regression" contenida en el software estadístico Statgraphics Centurion® XVI.

Por último, se determinó la corrida (o escenario) con el resultado económico más positivo con respecto a los resultados de VAN, TIR y PRI obtenidos, así como también aquella con el resultado menos favorable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Principales resultados técnico-económicos obtenidos durante la simulación del proceso de producción de cerveza a escala piloto

La tabla 6 presenta los principales indicadores técnico-económicos obtenidos durante la simulación del proceso de producción de cerveza en el simulador SuperPro Designer®.

Tabla 6. Principales indicadores técnico-económicos obtenidos durante la simulación del proceso de producción de cerveza en el simulador SuperPro Designer®

Indicador	Valor
Inversión total de capital (CUP)	570.000
Costo de operación (CUP/año)	187.000
Ganancias totales anuales (CUP/año)	351.000
Costo unitario de producción (CUP/botella)	12,82
Retorno de la inversión (CUP)	26,15
Periodo de retorno de la inversión (años)	3,82
Tasa interna de retorno (%)	28,83
Valor actual neto (CUP)	480.000
Costo total directo de la planta (CTDP)	
Costo de compra del equipamiento (CUP)	89.000
Instalación (CUP)	37.000
Tuberías (CUP)	31.000
Instrumentación (CUP)	36.000
Aislamiento (CUP)	3.000
Sistemas eléctricos (CUP)	9.000
Edificaciones (CUP)	40.000
Mejora de terreno (CUP)	13.000
Instalaciones auxiliares (CUP)	36.000
Total CTDP (CUP)	294.000
Costo total indirecto de la planta (CTIP)	
Ingeniería (CUP)	73.000
Construcción (CUP)	102.000
Pagos al contratista (CUP)	23.000
Contingencias (CUP)	47.000
Total CTIP (CUP)	245.000
Capital fijo directo (CFD) = CTDP + CTIP (CUP)	539.000
Otros	
Capital de Trabajo (CUP)	5.000
Costo de arrancada (CUP)	27.000
Producción anual de cerveza (botellas/año)	14.615
Ganancia bruta anual (CUP/año)	42.000
Ganancia neta anual (CUP/año)	76.000

Margen en bruto (%)	18,51 %
Gastos anual por salario (CUP/año)	39.000
Gasto anual por materia prima (CUP/año)	10.000
Gasto por material gastable (CUP/año)	32.000
Gasto anual por consumo de servicios auxiliares (CUP/año)	1.000
Tiempo del lote (h)	241,72 h
Número total de lotes/año	32 lotes/año

Fuente: elaboración propia.

Tomando en cuenta los resultados mostrados en la tabla 6, para una planta con una inversión inicial de CUP 570 000, el proyecto se puede calificar como económicamente rentable y confiable desde el punto de vista inversionista, puesto que el PRI no es superior a 5 años (3,82 años), la TIR es mayor a 25 % (28,83 %) y el VAN presenta un resultado positivo (CUP 480 000), lo cual es un indicativo de rentabilidad de la inversión y ganancias positivas (Baca, 2010; Sinnott & Towler, 2019; Towler & Sinnott, 2013).

Estudios previos relacionados con la evaluación económica de plantas de producción de cerveza empleando sorgo como materia prima obtuvieron los resultados que se muestran a continuación. Carvajal (2014) dimensionó una planta piloto de producción de cerveza empleando sorgo blanco UDG-110 como materia prima, con una capacidad de producción de 100 L/día, obteniendo un costo total de la inversión de CUP 106.965,18, un costo total de producción de CUP 16.755,44/año, una ganancia anual de CUP 28.436,56, un VAN de CUP 75.410,73, una TIR de 24 % y un PRI de 5,5 años. Por su parte, Ortega (2016) diseñó una planta piloto de producción de cerveza de 100 L/día con sorgo blanco UDG-110 como materia prima principal, obteniendo como resultado un VAN de CUP 1.905.901,7, una TIR de 40 % y un PRI de cuatro años y seis meses. Por último, Pino (2017) efectuó el diseño de una planta de producción de cerveza con la misma variedad de sorgo y capacidad de producción, obteniendo los siguientes resultados: VAN de CUP 14.760.706,1, TIR de 250,1 % y PRI de 1 año.

La tabla 7 muestra el desglose de las principales materias primas y materiales consumidos por año y su influencia porcentual en el costo total de producción.

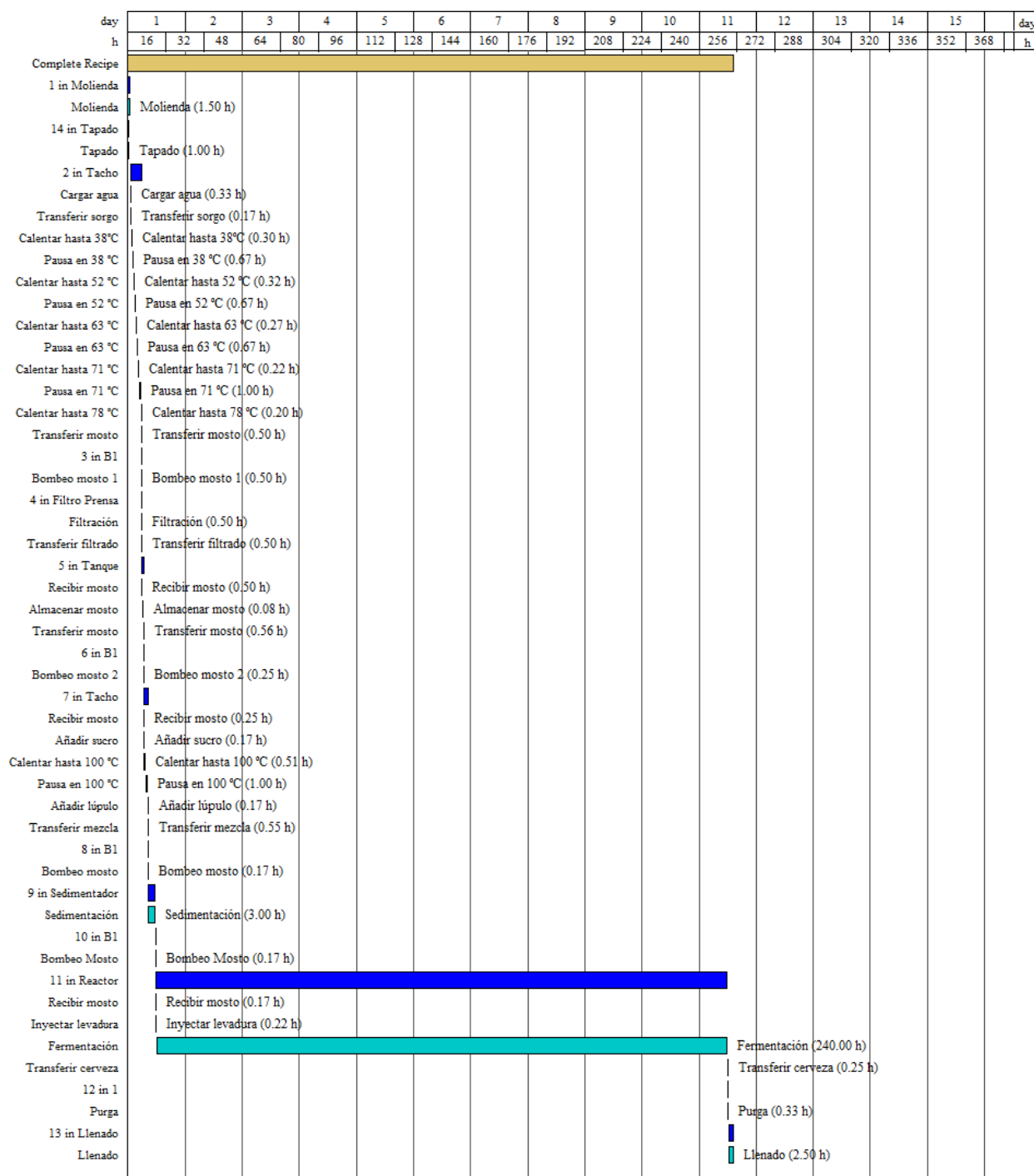
Tabla 7. Consumo de materias primas y materiales, y su influencia porcentual en el costo de producción

Materia prima o material	Cantidad consumida anual	Costo anual (CUP)	%
Sorgo	638 kg	8.970	63,01
Agua	6 m ³	1	0,00
Sacarosa	336 kg	120	0,84
Lúpulo	5 kg	559	3,93
Levadura	5 kg	11	0,08
Botellas	14.615 Ud	4.472	31,42
Tapas	14.615 Ud	102	0,72

Fuente: elaboración propia.

La figura 3 muestra el diagrama de Gantt obtenido mediante el empleo del simulador SuperPro Designer®.

Figura 3. Diagrama de Gantt del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132



Fuente: elaboración propia mediante el simulador SuperPro Designer®.

Evaluación del estudio de sensibilidad efectuado con respecto a las variables iniciales seleccionadas

La tabla 8 muestra los resultados del estudio de sensibilidad efectuado para las 11 corridas consideradas.

Tabla 8. Resultados obtenidos para cada una de las corridas experimentales incluidas en el estudio de sensibilidad efectuado

Corrida	VAN (CUP)	TIR (%)	PRI (años)
1	941.283	33,67	3,15
2	216.285	11,48	5,46
3	197.542	11,17	5,57
4	-44.451	5,70	7,67
5	426.759	17,58	4,02
6	216.285	11,48	5,46
7	-44.451	5,70	7,67
8	439.254	17,89	3,97
9	922.540	32,36	3,28
10	-44.451	5,70	7,67
11	-31.018	6,02	7,49

Fuente: elaboración propia.

Un análisis de la información en la tabla 8 permite establecer que la corrida n.º 1 presenta el escenario económico más optimista y positivo en cuanto a los mayores valores de VAN y TIR y el menor valor de PRI, con CUP 941.283, 33,67 % y 3,15 años, respectivamente. Esto se debe a que esta corrida presenta la mayor capacidad de producción (180 L/lote) con el mayor precio de venta de la cerveza (CUP 28,8/botella), así como el menor costo de compra del sorgo rojo (CUP 11,24/kg); es decir, se produce a la mayor capacidad de producción posible adquiriendo la principal materia prima consumida en el proceso (sorgo rojo) al menor precio de compra posible y vendiendo el principal producto obtenido (botella de cerveza) al mayor costo de venta posible, lo cual influye positivamente en la rentabilidad global del proceso productivo.

Por otro lado, las corridas n.º 4, 7 y 10 presentaron el peor escenario económico, con un VAN de CUP -44.451, una TIR de 5,70 % y un PRI de 7,67 años. Lo anterior se debe a que en las mismas se tiene el mayor costo de compra del sorgo (CUP 16,86/kg), así como el menor precio de venta de la cerveza (CUP 19,2/botella) para la menor capacidad de producción posible de la planta (120 L/lote).

Vale destacar que la corrida 11 también presentó resultados negativos con respecto a los valores de VAN (CUP -31.018), TIR (6,02 %) y PRI (7,49), lo cual se debe a que esta corrida presenta la menor capacidad de producción de cerveza posible (120 L/lote) y el menor precio de venta de la cerveza (CUP 19,2/botella).

Resultados obtenidos con respecto a la correlación estadística existente entre las tres variables de entrada y los indicadores VAN, TIR y PRI

Al evaluar la correlación estadística existente entre las tres variables de entrada consideradas (capacidad de producción de cerveza por lote, costo de adquisición del sorgo rojo y precio de venta de la botella de cerveza) sobre tres indicadores económicos importantes del proceso (VAN, TIR y PRI), se obtuvo una ecuación multifactorial para cada uno de los tres indicadores evaluados, las cuales se muestran a continuación.

Valor actual neto (VAN)

$$VAN = -1,84541E6 + 5331,67 * C + 890,517 * CS + 59569,7 * PC$$

Tasa interna de retorno (TIR)

$$TIR = -28,7312 + 0,0931736 * C - 0,0498962 * CS + 1,25282 * PC$$

Período de recuperación de la inversión (PRI)

$$PRI = 15,9756 - 0,0264757 * C + 0,0415555 * CS - 0,312782 * PC$$

Donde:

C = Capacidad

CS = Costo de compra de sorgo

PC = Precio de venta de la cerveza

La tabla 9 muestra los resultados estadísticos obtenidos para cada uno de los indicadores económicos incluidos en el estudio de correlación estadística efectuado.

Tabla 9. Resultados estadísticos obtenidos durante el estudio de correlación estadística realizado

Parámetro	VAN	TIR	PRI
R-cuadrada (%)	97,7517	99,9114	98,0787
R-cuadrado (ajustado para g.l.)	96,7882	99,8734	94,3981
Error estándar	501137	1,1411	1,3807
Error absoluto medio	389393	0,8350	0,9592
Estadístico Durbin-Watson	2,1785 (P = 0,6812)	2,2796 (P = 0,7439)	1,9050 (P = 0,4904)
Autocorrelación de residuos en retraso 1	-0,1778	-0,2032	-0,0050

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

El proceso de producción de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132 a escala piloto (150 L/lote) puede considerarse de rentable desde el punto de vista técnico-económico considerando los valores de VAN (CUP 480.000), TIR (28,83 %) y PRI (3,82 años) obtenidos en este trabajo.

La corrida que mejor escenario económico presentó durante el estudio de sensibilidad efectuado fue la n.º 1, con una VAN = CUP 941.283, una TIR = 33,67 % y un PRI = 3,15 años, mientras que las de peor resultado económico fueron las n.º 4, 7 y 10, con un VAN = CUP -44.451, TIR = 5,70 % y PRI = 7,67 años.

Se obtuvieron correlaciones estadísticas que permiten relacionar cuantitativamente los indicadores VAN, TIR y PRI con tres parámetros iniciales del proceso productivo: (i) capacidad de producción de cerveza por lote, (ii) costo de adquisición del sorgo rojo y (iii) precio de venta de la botella de cerveza.

REFERENCIAS

- Aguiar, A. C. D., Osorio-Tobón, J. F., & Silva, L. P. S. (2018). Economic analysis of oleoresin production from malagueta peppers (*Capsicum frutescens*) by supercritical fluid extraction. *The Journal of Supercritical Fluids*, 133, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.09.031>
- Alfonso, H. M. (2018). *Estudio preliminar del proceso de obtención de cerveza a partir de sorgo rojo CIAP R-132 a escala de laboratorio* (tesis de diploma, Universidad de Camagüey, Cuba). Repositorio Universidad de Camagüey.
- Auli, N. A., Sakinah, M., Bakri, A. M. M. A., Kamarudin, H., & Norazian, M. N. (2013). Simulation of xylitol production: A review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(5), 366-372.
- Baca, G. (2010). *Evaluación de proyectos* (6.^a ed.). McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Carvajal, N. (2014). *Perfeccionamiento del proceso de producción de cerveza a partir de malta de sorgo* (tesis de diploma, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba). Repositorio Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- Csighy, A., András, K., & Vatai, G. (2017). Modelling the partial demineralization process of cow milk by SuperPro Designer. *Hungarian Journal of Industry And Chemistry*, 45(2), 9-12. <https://doi.org/10.1515/hjic-2017-0013>
- Díaz, Y. (2014). *Perfeccionamiento del proceso de malteado de sorgo para la producción de maltinas para enfermos celíacos* (tesis de diploma, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba). Repositorio Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- Ernst, S., Garro, O. A., Winkler, S., Venkataraman, G., Langer, R., Cooney, C. L., & Sasisekharan, R. (1997). Process simulation for recombinant protein production: cost estimation and sensitivity analysis for heparinase I expressed in *Escherichia coli*. *Biotechnology and Bioengineering*, 53(6), 575-582. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19970320\)53:6<575::AID-BIT5>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19970320)53:6<575::AID-BIT5>3.0.CO;2-J)
- Gallardo, I., Boffill, Y., Ozuna, Y., Gómez, O., Pérez, M., & Saucedo, O. (2013). Producción de bebidas usando sorgo malteado como materia prima para enfermos celíacos. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4(1), 61-73.
- Gallardo, I., Rodríguez, L., Boffill, Y., Alemán, L., & Pérez, M. (2011). Producción de bioetanol empleando las enzimas generadas del sorgo malteado. *Afinidad*, 68(552), 144-149.
- Govindarajan, D. K., Meganathan, Y., Udayakumar, G. P., & Kothandan, R. (2019). Techno-economic analysis for the production of ethanol from *Ipomoea batatas* (sweet potato). *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, February, 13-24.
- Ibrahim, N. H., Ibrahim, W. H. W., Sakinah, A. M. M., Harun, N., & Othman, M. R. (2020). Sensitivity analysis of xylose production process using aspen plus. *IOP Conf. Series:*

Materials Science and Engineering, 736, 1-9. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022110>

- Lam, K. F., Leung, C. C. J., Lei, H. M., & Lin, C. S. K. (2014). Economic feasibility of a pilot-scale fermentative succinic acid production from bakery wastes. *Food and Bioproducts Processing*, 92, 282-290. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.09.001>
- Mani, S., Sundaram, J., & Das, K. C. (2016). Process simulation and modeling: Anaerobic digestion of complex organic matter. *Biomass and Bioenergy*, 93, 158-167. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.07.018>
- Nieblas, C., Gallardo, I., Rodríguez, L., Carvajal, N., González, J. F., & Pérez, M. (2016). Obtención de bebidas y otros productos alimenticios a partir de dos variedades de sorgo. *Centro Azúcar*, 43(3), 66-77.
- Ortega, M. (2016). *Producción de cerveza empleando integralmente el grano de sorgo* (tesis de diploma, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba). Repositorio Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- Pérez, E. J. (2016). *Simulación del proceso de producción de cerveza a escala piloto* (tesis de diploma, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba). Repositorio Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). *Chemical Engineers' Handbook* (8.^a ed.). McGraw-Hill.
- Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2003). *Plant design and economics for chemical engineers* (5.^a ed.). McGraw-Hill.
- Pino, M. S. (2017). *Tecnología para la producción de cerveza a partir de malta de sorgo para enfermos celíacos* (tesis de diploma, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba). Repositorio Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- Ramatoulaye, F., Mady, C., Fallou, S., Amadou, K., Cyril, D., & Massamba, D. (2016). Production and use of sorghum: A literature review. *Journal of Nutritional Health & Food Science*, 4(1), 1-4. <https://doi.org/10.15226/jnhfs.2016.00157>
- Rao, S. R. (2005). *Biomass to ethanol: process simulation, validation and sensitivity analysis of a gasifier and a bioreactor* (tesis de maestría, Oklahoma State University). SHAREOK Repository.
- Razi, N., Svendsen, H. F., & Bolland, O. (2013). Cost and energy sensitivity analysis of absorber design in CO₂ capture with MEA. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 10, 331-339. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.09.008>
- Rodríguez, L., Gallardo, I., Nieblas, C., Medina, J., & Ortiz, W. (2015). Obtención de jarabes dextrinizados mediante hidrólisis enzimática del almidón de sorgo. *Centro Azúcar*, 42(4), 49-58.
- Rodríguez, L., Gallardo, I., Nieblas, C., & Ortiz, W. (2015). Evaluación de dos variedades de sorgo para la obtención de almidón. *Centro Azúcar*, 42(1), 88-95.

Sayar, N. A., Pinar, O., Kazan, D., & Sayar, A. A. (2019). Bioethanol production from Turkish hazelnut husk process design and economic evaluation. *Waste Biomass Valor*, 10, 909-923. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0103-y>

Sinnott, R., & Towler, G. (2019). *Chemical Engineering Design* (6.^a ed., vol. 6). Elsevier Butterworth-Heinemann.

Suárez, V. D., López, I., & Álvarez, M. (2019). Estimación de la producción de biogás a partir de un modelo de simulación de procesos. *Centro Azúcar*, 46(1), 73-85.

Tang, Z.-C., Zhenzhou, L., Zhiwen, L., & Ningcong, X. (2015). Uncertainty analysis and global sensitivity analysis of techno-economic assessments for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 175, 502-508. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.162>

Towler, G., & Sinnott, R. (2013). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design* (2.^a ed.). Elsevier Ltd.